Calculation of Microhardness Changes in 2.5 MeV Proton Irradiation on TSX Grade Graphite Structure

*Mohamad Amin Amirkhani Dehkordi¹, Mohsen Asadi Asadabad¹, Mostafa Hassanzadeh¹, Sayed Mohamad Mirvakili¹

1- PhD., Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.

Citation: Amirkhani Dehkordi M. A, Asadi Asadabad M, Hassanzadeh M, Mirvakili S. M. Calculation of Microhardness Changes in 2.5 MeV Proton Irradiation on TSX Grade Graphite Structure. Metallurgical Engineering 2020: 23(2): 154-162 http://dx.doi.org/10.22076/ me.2020.121256.1281

doj : http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.121256.1281

ABSTRACT

Change in the position of atoms in the material's crystalline lattice is caused by the radiation. Changes in the macroscopic properties of the material will be created by the change in structure. Knowing the amount of variation of material properties is necessary for materials in high-radiation environments. In this paper, the effect of 2.5 MeV proton irradiation on TSX grade graphite structure is investigated. This graphite is used as a reflector in the Tehran research reactor. The radiation has been carried out with the proton for 276 minutes. Microhardness test, Raman test, and SEM images were used in this study. The results show an increase in the microhardness of the material due to the radiation. Increased vacancy and interstitial clusters have also been observed in the Raman spectrum. The creation of cavities on the surface of irradiated graphite is observed in SEM images. The results can be verified by using the point defect model.

Keywords: Radiation damage, TSX graphite, Microhardness, Proton irradiation, Raman spectrum.

Received: 5 February 2020 Accepted: 15 December 2020

* Corresponding Author:
 Mohamad Amin Amirkhani Dehkordi, PhD
 Address: Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.
 Tel: +98 (9131854022)
 E-mail: mamirkhani@aeoi.org.ir

.....





محاسبه تغییرات میکروسختی در تابش پروتون ۲/۵ MeV بر ساختار گرافیت درجه TSX

*محمد امین امیرخانی دهکردی'، محسن اسدی اسدآباد'، مصطفی حسنزاده'، سید محمد میروکیلی'

۱- دکتری، پژوهشکدهی راکتور و ایمنی هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

چگيده

تغییر در موقعیت اتمها در شبکه بلوری ماده در اثر تابش ایجاد میشود. تغییر ساختار سبب تغییر در مشخصات ماکروسکوپی ماده خواهد شد. دانستن مقدار تغییرات انواع خصوصیات ماده در محیطهای با تابش بالا ضروری است. در این مقاله به مطالعه تاثیر تابش پروتون با انرژی ۲۵۷ ۲/۵ بر ساختار گرافیت با درجه TSX پرداخته شده است. این نوع گرافیت در راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان بازتابنده استفاده میشود. تابش دهی برای مدت زمان ۲۷۶ دقیقه با پروتون انجام شده است. در بررسی انجام گرفته از تست میکرو سختی، تست رامان و تصاویر SEM استفاده شده است. نتایج، افزایش میکروسختی ماده در اثر تابش را نشان میدهد. همچنین افزایش حلقهای تههیجا و بیننشینها در بررسی طیف رامان بدست آمده است. ایجاد حفرههای در سطح گرافیت تابش دیده، در تصاویر SEM مشاهده شده است. عیوب نقطهای قابل بررسی می باشد.

واژههای کلیدی: آسیب تابش، گرافیت TSX، میکروسختی، تابش پروتون، طیف رامان.

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

۱. مقدمه

امروزه مطالعه آثار ناشی از تابش پرتوها بر روی مواد و عیوبی که در ساختار کریستالی آنها بر اثر برخورد این پرتوها بوجود میآید در بسیاری از سیستمها از جمله راکتورهای شکافت و گداخت، شتابدهندهها، ماهوارههای فضایی، سیستمهای پزشکی و… نقش بسیار مهمی دارند [۱]. برهمکنش تابشهای پر انرژی با شبکه بلوری منجر به عیوبی همچون تهی جاها، بیننشینها، یونش و برانگیختگی اتمی میشوند که سبب تغییرات در مشخصات ماکروسکویی ماده می شوند [۲].

پروتون، آلفا، نوترونهای سریع و پارههای شکافت معمولاً انرژی کافی را از طریق برخوردهای الاستیک و غیرالاستیک برای حذف هسته از موقعیت شبکه بلوری مواد انتقال میدهند [۳]. یک اتم در شبکه باید مقدار انرژی کمینهای را دریافت کند تا از جایگاهش در شبکه خارج شود که به این انرژی، انرژی جابجایی یا آستانه جابجایی گویند و با E_d نشان داده میشود [۴]. اتم خارج شده همچون یک هسته پس زده شده ممکن است سبب آبشاری از جابجاییهای اتمی شود [۵]. اگر انرژی اتم پس زده شده به اندازه کافی زیاد باشد ممکن است سبب

افزایش زنجیره برخوردها و هستههای پس زده شده شود. این فرآیند ادامه می یابد تا اتم جابجا شده، انرژی کافی برای خارج کردن اتم دیگر از شبکه بلوری نداشته باشد. بنابراین آبشاری از هستههای پسزده از نخستین واکنش از یک جزء تابشی با انرژی زیاد با یک اتم جامد توسعه پیدا می کند [۳]. هنگامی که یک اتم فلز از شبکه بلوری بیرون انداخته می شود یک حفره (Vacancy) در ساختار شبکه ایجاد می شود. اتمهای جابجا شدهی پایدار ممکن است انرژیشان را از دست داده و موقعیت دیگری از مکان شبکه بلوری معمولی را اشغال کنند که اتم بیننشین (Interstitials) را بوجود می آورد [۳]. این دو منسوب به جفتهای فرانکل (Frankel Pairs) هستند [۶]. افزایش تهی جاها واتمهای بیننشین مشخصات فلزات را تغییر مىدهد [۳]. برخوردهاى پروتون-اتم يا اتم-اتم به وسيلهى برهمکنشهای میان ابرهای الکترونی، ابر الکترونی و هسته و ميان هستهها كنترل مي شوند. اين برهم-كنش-ها به وسيلهي آن چه که به عنوان پتانسیلهای بین اتمی شناخته شدهاند، توضيح داده می شوند. در تابش دهی نوترون به علت خنثی

www.SID.ir

^{*} نویسنده مسئول:

دکتر محمد امین امیرخانی دهکردی

نشانی: تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، پژوهشکدهی راکتور و ایمنی هستهای. **تلفن: (۹۱۳۱۸۵۴۰۲۲)** ۹۱+

پست الکترونیکی: mamirkhani@aeoi.org.ir

Archivelogsin

بودن بار الکتریکی نوترونها، میتوان برخوردهای کشسان بین نوترونها و هستهها را به مثابهی برخورد کرههای سخت در نظر گرفت [۴].

گرافیت درجه هستهای به دلیل پایداری گرمایی و استحکام در دمای بالا و خلوص بسیار بالا، استفاده وسیعی به عنوان کندکننده و بازتابنده در راکتورهای هستهای داشته است. اولین استفاده از گرافیت در راکتورها توسط فرمی در سال ۱۹۴۲ در راکتور دانشگاه شیکاگو صورت گرفت [۷]. از کاربردهای دیگر گرافیت میتوان به استفاده به عنوان حفاظ نوترونی در راکتورهای زاینده با خنککننده سدیم، پوشش سوختهای جدید و همچنین به دلیل ضریب انتقال حرارت بالا و مقاومت بالا در برابر شوکهای گرمایی به کاربرد در راکتورهای گداخت هستهای اشاره کرد [۸–۱۱].

تحت تابش شبکه گرافیت گسترشی در طول محور c و انقباضی موازی در صفحات پایهای را تحمل میکند. این تغییر ابعاد مربوط به جابجاییهای اتمهای کربن ناشی از تابش است، که انباشت خوشههای بیناتمی در بین صفحات پایه جداشدگی صفحات را ناشی می شود. این تغییر ساختار میکروسکوپی ناشی از تابش، تأثیر عمیقی بر مشخصههای فیزیکی همچون مدول یانگ، استحکام شکست و رسانندگی گرمایی و الکترونیکی دارد [۱۲]. Oku خزش کششی (tensile creep) را برای نوعی از گرافیت در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد برای محدوده تابشدهی $m_{m^2}^{\prime \prime \prime}$ بحث کرده است و پیشنهاد یک افزایش یکنواخت در ضریب خزش تابشی را با دمای تابشدهی داده است. همچنین یک افزایش در ضريب انبساط حرارتي (Coefficient of thermal expansion (CTE)) به دنبال تابشدهی قابل مشاهده است [۱۳]. یکی از معروفترين مدلها براي توصيف تغييرات ابعادي مدل "عيوب نقطهای (Point defect)" است. این مدل پیشنهاد می کند که تهیجاها ناشی از تابش در صفحات پایه جمع میشوند و حلقههای جابجا شده کوچک را شکل میدهند. پس از آن، نابودی این حلقهها موجب انقباض در راستای a/b می شود و انبساط در جهت c مربوط به تراکم صفحات جانبی بین صفحات پایه، باعث شکل گیری لایههای جدید می شود [۱۴]. در کشور ما، ایجاد کدهای محاسباتی برای انجام محاسبات اثرات تابش نوترون مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۵]. همچنین تاثیر تابش نوترون بر ثابت آسیب جریان معکوس α در چندین مدل از دیودهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. بررسی مكانيسم آسيب تابش بر آلومينيم و آلياژهاي آن كه به عنوان غلاف راكتورهاى تحقيقاتي مورد استفاده قرار مى گيرد نيز مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۷].

۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به بررسی تغییرات ایجاد شده در میکروسختی گرافیت درجه TSX با استفاده از تابش پروتون MeV ۲/۵ MeV www.SID.ir

پرداخته شده است. تستهای میکروسختی و رامان از نمونهها قبل و بعد از تابش دهی گرفته شده است و نتایج بدست آمده با استفاده از مدل عیوب نقطهای بررسی خواهد شد. به دلیل ایجاد آلودگی پرتویی در مواد تابش دیده با نوترون و عدم وجود امکانات لازم برای بررسی مستقیم اثر تابش نوترون بر ساختار ماده استفاده از تابش یونهایی همچون پروتون برای بررسیهای اولیه اثرات تابش مطابق با مراجع [۴] روشی بسیار مناسب می باشد.

شتابدهنده واندوكراف

در این پژوهش برای پرتودهی پروتون از شتابدهنده واندو گراف موجود در سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شده است. این شتابدهنده در سال ۱۳۵۱ نصب و اولین آزمایشهای آنالیز عنصری در سالهای ۵۷-۵۵ با روش پیکسی در آن انجام گرفته است. این شتابدهنده توانایی افزایش انرژی پروتون تا MeV را دارا است. در دهه ۹۰ میلادی، در چهارچوب طرحی با آژانس بین المللی انرژی اتمی، امکانات آنالیز با باریکه یونی که پیش از آن عملا به پیکسی و به صورت جانبی به پسیراکندگی رادرفورد و واکنشهای هستهای محدود بود گسترش یافت و وسایل تجربی جدید، امکانات روزآمد و پیشرفتهای در اختیار آزمایشگاه واندوگراف قرار گرفت که امکان انجام آنالیزهای جدیدی فراهم شده است. هماکنون روشهای پیشرو برای آنالیز با باریکه یونی در آزمایشگاه واندوگراف مورد استفاده قرار می گیرد شکل ۱ شماتیک سیستم استفاده شده برای تغییر دما در هنگام تابشدهی پروتون را نمایش میدهد. این سیستم از یک کوره لولهای الكتريكي (Electric tube furnace) و يك تنظيم كننده دما تشکیل شده است. با تنظیم دمای مورد نظر، جریان عبوری از کوره شروع به نوسان کرده تا در دمای مورد نظر به حالت یایدار دست ییدا کند.

آماده سازی نمونه

برای تابشدهی یونی، نمونهای از گرافیت درجه TSX با ابعاد ۸۰۰، ۲۰۰۱ که به کمک سنباده درجههای ۲۰۰، ۸۰۰، و ۳۰۰۰ صیقل و به کمک استون شستشو داده شده مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد نمونه با استفاده از میکرومتر اندازه گیری شده است. تخلخل نمونه با کمک روش BET برابر با ۲۲% بدست آمده است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی این گرافیت را نشان میدهد.

تست ميكروسختي

از تست میکروسختی برای دستیابی به مولفه سختی ماده استفاده شده است. این آزمایش برای ارزیابی سنجش مواد، کنترل کیفیت فرآیند تولید و توسعه بسیار مهم است. سختی



شکل ۱. شماتیک سیستم تابشدهی پروتون

찬 مهندسي متالور ژي

جدول ۱. خواص گرافیت درجه TSX [۱۸]

TSX	واحد	مشخصه
١/٧١	g.cm ⁻³	چگالی
۴/۱×۱۰ ^{-۶}	K ⁻¹	ضريب انبساط حرارتي
۶	μΩm	مقاومت الكتريكي
11/4-14	GPa	مدول يانگ
۲۵	MPa	استحکام خمش (Flexural bending)
٣٨	MPa	استحکام فشاری (Compressive strength)

همراه با تنش کششی یک شاخص برای مقاومت پوشش و چکش خواری مواد است. این آزمایش همچنین برای تعیین فاز مورد استفاده قرار می گیرد. چندین روش آزمایش سختی Troop, Tukors ی عبارتند از : Knoop, Tukor که آزمایشات سختی ماکرو و Knoop, Tukor که آزمایشات سختی میکرو می اشند [۱۹]. در این پژوهش از روش ویکرز (Vickers) مطابق با استاندارد ASME C1327 استفاده شده است. در این آزمون raticl الماسی هرمی شکل با زوایای مشخص تحت نیروی تعیین شده بر ماده اثری مربع شکل ایجاد می کند که از اندازه گیری قطر آن مقدار سختی بدست می آید. نمونه این آزمون باید ضخامتی بیش از مربع می داریم [۲۰]:

www.SID.ir

رابطه (۱)

$$HV = 0.0018544 \left(\frac{P}{d^2}\right)$$
by P isomorphic to the second second term of the second term of ter

رابطه (۲)

 $\sigma_{\rm c}=0.44 HV\pm0.8$

است. در Kg/mm²) که در آن $\sigma_{\rm c}$ است. در (Kg/mm²) این پژوهش از دستگاه qualitest qv1000 برای انجام آزمون

ArchivelofsH

استفاده شده است. مقدار بار اعمالی برابر با ۵۰ گرم و زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ تصویر SEM از محل اثر ایجاد شده در هریک از نمونهها نشان داده شده است.



نمونه تابش نديده



نمونه تابش ديده

شکل ۲. تصاویر SEM از نقطه اثر آزمون ریزسختی سنجی

طيف رامان

طیف رامان برای بررسی سطح و ساختار مواد کربنی برای سالیان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. تئوری رامان بر این اساس است که نتیجه طیف رامان که پراکندگی غیرالاستیک فوتونها بوسیلهی مولکولها است زمانی که یک پرتو نور به روی نمونه برخورد می کند افزایش یافته و کسری از نور پراکنده میشود. بزرگی این نور پراکنده شده پراکندگی الاستیک است و تغییر مکان در انرژی را سبب میشود. از نور برخوردی، دارای پراکندگی غیرالاستیک است. بزرگی نتیجه شده تغییر مکان رامان (Raman shift) نامیده میشود و مربوط به مشخصهی ارتعاشی ذاتی مولکول و به طور خاص پیوند مربوطه است که میتواند مربوط به ساختار اتم و عیوب

www.SID.ir

باشد و به منظور تعیین تحلیل کمی استفاده می شود. هر نقص مهم ناشی شده از ویژگی های رامان از فونون ها و مشخصات منعکس شدهی ناهنجاری کوهن سرچشمه می گیرد، فرکانس نمایشگر برای ارتعاشات گرافیت در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. ارتعاشی گزارش شده برای گرافیت [۲۲]

فرکانس رامان (cm ⁻¹)	قله رامان	مرتبه رامان
120.	D	
۱۵۸۰	G	اول
187.	D'	
۲۷۰۰	G'(2D)	
790.	D"(D+D')	دوم
274.	G"(2D')	

رابطه (۳)

L_a = 2.4 × 10⁻¹⁰ λ⁴
$$\left(\frac{\mathsf{I}_{(D)}}{\mathsf{I}_{(G)}} \right)^{-1}$$

که در آن λ طول موج لیزر برحسب nm است.

۳. نتایج و بحث

تابش دهی پروتون

در جدول ۳ برنامه تابش پروتون انجام شده نمایش داده شده است. قطر بیم پروتون برخورد کرده به سطح نمونه mm میباشد. همچنین پروفایل آسیب ایجاد شده در نمونه تابش دیده که با استفاده از کد SRIM محاسبه شده است در شکل ۳ نمایش داده شده است. مشاهده میشود که ناحیه آسیب از دو منطقه تشکیل شده است، یک منطقه یکنواخت آسیب (کمتر از ۶۰ میکرومتر) و یک قله در ۷۰ میکرومتر از سطح نمونه. در ناحیه اول به دلیل انرژی زیاد، پروتون در اثر برخوردهای الاستیک و غیر الاستیک انرژی خود را از دست میدهد. در ناحیه



آسيب (dpa)	جريان(p /cm ²)	شار (p/cm².s)	زمان(min)	نمونه
•	•	٠	•	١
• / • ٢	۱/۴۶×۱۰ ^{۱۸}	۸/۸۴×۱۰ ^{۱۳}	۲۷۶	٢
	0.60 0.50 - 0.40 - 0.50 -			
	0.00	••••••	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	0 20	40 Implantation depth (um	60 80 1)	
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	,	

جدول ۳. برنامه تابش پروتون نمونههای گرافیت

شکل ۳. پروفایل آسیب جابجایی بوسیلهی پروتون ۲/۵ MeV در نمونه گرافیت TSX

دوم در اثر کاهش انرژی و سرعت، پروتون در اثر برهمکنشهای الکترومغناطیسی انرژی خود را از دست میدهد [۴].

تست میکروسختی

در آزمایش میکروسختی برای هر نمونه، اندازه گیری در ده نقطه مختلف از سطح نمونه، انجام شده و مقدار سختی اندازه گیری شده است. همچنین با تبدیل عدد سختی و به کمک رابطه (۲) مقادیر استحکام فشاری بدست آمده است. نتایج بدست آمده از این آزمون در جدول ۴ آورده شده است. همان طور که ملاحظه میشود با افزایش تابش دهی، مقدار متوسط سختی افزایش یافته است. این افزایش سختی در مراجع دیگر نیز مشاهده شده است [۲۵]. با افزایش تابش لایه جدید در بین دو لایه اتمی حابجا شده شروع به تشکیل میکنند. این لایه جدید اتصالات بین لایههای مختلف گرافیت را افزایش می دهد و این پدیده، سبب افزایش سختی در ماده میشود. افزایش پارامتر c شبکه پس از تابش دهی در ماده میشود. افزایش پارامتر c شبکه پس از تابش دهی در نتایج تست XRD گزارش شده در مراجع مشاهده شده است [۲۶].

طيف رامان

شکل ۴ طیف رامان بهنجار شده از نمونههای گرافیت را نشان میدهد. در طیف رامان گرافیت وجود قلههای (۱۳۵۰ cm۰۱ d، www.SID.ir

، (۲۹۵۰ میلا) G (۱۵۸۰ cm⁻¹) ، C (۱۵۲۰ cm⁻¹) ، G (۱۵۸۰ cm⁻¹) ، C معمول است (۲۲]. (۲۹۵۰ cm⁻¹) تو (۲۹۵۰ cm⁻¹) ۳ معمول است (۲۲]. نسبت شدت d^{-1} ، اندازه بلور در صفحه، FWHM و نسبت الرام در جدول ۵ آمده است. افزایش FWHM نشان از افزایش تجمع حفره ها در ساختار ماده دارد [۲۲]. این افزایش تجمع حفره ها در ساختار ماده دارد [۲۲]. این افزایش تجمع حفره ها در ساختار ماده دارد [۲۲]. این میشود. کاهش نسبت d^{-1} میتواند به دلیل کاهش تعداد حلقه عیوب بیناتمی و تُشکیل حلقههای بزرگتر از اجتماع حلقههای کوچکتر باشد [۲۷]. کاهش نسبت d^{-1} منجر به افزایش اندزه (Å) میشود که در جدول ۵ قابل مشاهده

شکل ۵ تغییرات FWHM₆ با م^ارا نمایش میدهد. نتایج با دادههای بدست آمده از تابش نوترون بوسیلهی (۲۸]و همچنین گرافیتهای راکتور British Experimental Pile Zero (BEPO) [۲۲]مقایسه شده است. این نتایج مشابه با نتایج حاصل از XRD نشان میدهند که ساختار بلوری ماده پس از این مقدار تابشدهی باقی مانده است و با افزایش مقدار تابشدهی ساختار بلوری در حال از بین رفتن است [۲۳].



	یش دیدہ	نمونه تاب		نمونه تابش نديده				
سختی (HV)	درصد حد مجاز	D2 (μm)	D1 (µm)	سختی (HV)	درصد حد مجاز	D2 (µm)	D1 (μm)	نقطه اثر
14/30	1/94	56/12	۵۵/۶۳	١٢/٧	۴/۹٩	87	۵۸/۹۸	١
٩ ٨/۴ ١	۲/۲۱	۵۱/۹۷	۵۳/۱۳	۱۱/۲	4/29	84/30	۶١/۶۵	٢
۱۲/۵	٣/٣٧	49/28	۵۰/۹۷	17/77	•/۵۵	۶۰/۲	8.102	٣
١٨/٢	١/٩٢	۶١/٠٨	۵٩/٩٢	۸/۴۲	٣/۴٢	V۴/۳۲	۲۱/۸۲	۴
17/8	۲/۲۳	٧٠/۴	۶۸/۸۵	٨/١٩	1/•4	۲۵/۶	۲۴/۸۲	۵
۱۴/۷	١/٣۵	۶۴/۹۷	84/1	٨/٢	١/۶٩	۷۴/۶۸	۷۵/۹۵	۶
11/1	•/١١	57/32	۵۲/۲۷	٨/٣	۳/۵۶	۷۳/۲	ν۵/λ۵	γ
۱۰/۶	٠/۴۵	۵۱/۲۵	۵۱/۰۲	17/78	۱/۸۴	87/18	۶۱	٨
۱۲/۳	•/٣۴	۵۰/۴	۵۰/۲۳	18/84	٣/٠٩	۵۷/۴	۵٩/۲	٩
۱۵/۵	1/48	49/8V	۵۰/۴	17/42	۳/۴۳	57/45	۵۰/۶۸	١.
	۱۳/	۶۷			۱۰/	۶۸		متوسط سختى
	۶/ •	١			۴/	٧		σc

جدول ۴. نتایج آزمون میکروسختی و استحکام فشاری



شکل ۴. طیف رامان نمونههای گرافیت

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر تابش پروتون MeV پرداخته مشخصه مکانیکی (میکروسختی) گرافیت درجه TSX پرداخته شده است. اندازه گیری انجام شده نشان از افزایش میکرو سختی ماده پس از تابش دهی دارد. به منظور درک بهتر از دلیل افزایش میکروسختی از ماده، تست رامان گرفته شده است. با استفاده از تست رامان و نتایج موجود در مراجع از تست XRD نمونههای تابش دیده با نوترون، مشاهده شده است که پس از تابش دهی، اتمهای بیننشین شروع به تشکیل صفحات جدید در راستای عمود بر شبکه بلوری ماده کردهاند و این صفحات جدید با ایجاد پیوند با دو صفحه دیگر سبب افزایش سختی ماده شدهاند. افزایش تجمع تهی جاها نیز در تست رامان مشاهده شده است که در تصاویر SEM از ماده به شکل افزایش حفره خود را نشان داده است. نتایج بدست آمده با استفاده از مدل عیوب نقطهای، قابل توضیح و بررسی می باشند.





گرافیت TSX	نمونههای	رامان از	ی طیف	، آناليز كم	جدول ۵
------------	----------	----------	-------	-------------	--------

l _{D''} /l _G	$FWHM_{G}(cm^{-1})$	$L_a(Å)$	I _D /I _G	نمونه
•/۴٩٣٧	۲۳/۸۵	3774/0	•/۵١٢٩٩	تابش نديده
•/٣٧٢٩	۲۸/۱۷	m V9/V	•/0•970	تابش دیدہ



شکل ۵. FWHM بر حسب $I_{\rm D}/I_{\rm G}$ در انواع مختلف گرافیت



نمونه تابش ندیده **شکل ۶.** تصاویر SEM از سطح نمونه گرافیت TSX قبل و بعد از تابشدهی

نمونه تابش ديده

www.SID.ir



References

- [1] Nordlund K, Sand A, Granberg F, Zinkle S, Stoller R, Averback R, et al. Primary Radiation Damage in Materials: Review of Current Understanding and Proposed New Standard Displacement Damage Model to Incorporate In-cascade Mixing and Defect Production Efficiency Effects. OECD Nuclear Energy Agency; 2015.
- [2] Olander DR. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. California Univ., Berkeley (USA). Dept. of Nuclear Engineering, 1976.
- [3] Handbook DF. Material Science. Volume. 1993;2:72.
- [4] Was Gary S. Fundamentals of Radiation Materials Science. Berlin Heidelberg: Springer; 2007.
- [5] Holbert KE. Radiation Effects Damage. Dr Holbert's Course "EEE 598-Radiation Effects. 2012.
- [6] Johnston A, Swift G, Scheick L, Conley Jr J. Space radiation effects on microelectronics. Jet Propulsion Laboratory, Electronic Parts Engineering Office, Section. 2002;514.
- [7] Mukhopadhyay P, Gupta RK. Graphite, Graphene, and their polymer nanocomposites: CRC Press; 2012.
- [8] Lukez R. The Use of Graphite/Epoxy Composite Structures in Space Applications. 1987.
- [9] Maahs HG, Schryer DR. Chemical impurity data on selected artificial graphites with comments on the catalytic effect of impurities on oxidation rate. 1967.
- [10] Deslandes A, Guenette MC, Corr CS, Karatchevtseva I, Thomsen L, Ionescu M, et al. Ion irradiated graphite exposed to fusion-relevant deuterium plasma. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2014;340:21-6.
- [11] Atsumi H, Muhaimin A, Tanabe T, Shikama T. Hydrogen trapping in neutron-irradiated graphite. Journal of Nuclear Materials. 2009;386:379-82.
- [12] Karthik C, Kane J, Butt DP, Windes WE, Ubic R. Neutron irradiation induced microstructural changes in NBG-18 and IG-110 nuclear graphites. Carbon. 2015;124:131-86.
- [13] Snead L, Contescu C, Byun T, Porter W. Thermophysical property and pore structure evolution in stressed and nonstressed neutron irradiated IG-110 nuclear graphite. Journal of Nuclear Materials. 2016;476:102-9.
- [14] Hinks J, Haigh S, Greaves G, Sweeney F, Pan C, Young R, et al. Dynamic microstructural evolution of graphite under displacing irradiation. Carbon. 2014;68:273-84.

- [10] محمدی ع, حمیدی س, اسدی اسدآباد م. محاسبات آسیب تابش به منظور شبیه سازی تابش نوترون با تابش یون و توسعه برنامه محاسباتی AMTRACK. پژوهش فیزیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۹۲۱-۸۱.
- [18] حسینی ا, فقهی س, جعفری ج, آقایی م. اندازه گیری میزان تاثیر تابش نوترون بر ثابت آسیب جریان معکوس α دیود. علوم و فناوری فضایی. ۱۳۹۲؛ ۱۱:۱۹-۶.
- [۱۷] آقامحمدی ع. بررسی اثر تشعشعات هستهای بر خواص مکانیکی آلومینیوم و آلیاژهای آن. ۱۳۷۱.
- [18] Shabalin IL. Ultra-high temperature materials I: carbon (graphene/graphite) and refractory metals: Springer; 2014.
- [19] Standard A. E384 11 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA. 2012.
- [20] Conshohocken W. Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics 1. Test. 2003:1-10.
- [21] Oku T, Eto M. Correlation between the strength and Vickers hardness of some nuclear graphite. Carbon. 1974;12(4):477-9.
- [22] Krishna R, Jones A, McDermott L, Marsden B. Neutron irradiation damage of nuclear graphite studied by high-resolution transmission electron microscopy and Raman spectroscopy. Journal of Nuclear Materials. 2015;467:557-65.
- [23] Nakamizo M, Honda H, Inagaki M. Raman spectra of ground natural graphite. Carbon. 1978;16(4):281-3.
- [24] Krishna R, Wade J, Jones AN, Lasithiotakis M, Mummery PM, Marsden BJ. An understanding of lattice strain, defects and disorder in nuclear graphite. Carbon. 2017;124:314-33.
- [25] Zhang B, Xia H, He X, He Z, Liu X, Zhao M, et al. Characterization of the effects of 3-MeV proton irradiation on finegrained isotropic nuclear graphite. Carbon. 2014;77:311-8.
- [26] Amirkhani MA, Asadabad MA, Hassanzadeh M, Mirvakili SM. The effects induced by proton irradiation on structural characteristics of nuclear graphite. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2019:1-9.
- [27] Elman B, Dresselhaus M, Dresselhaus G, Maby E, Mazurek H. Raman scattering from ion-implanted graphite. Physical Review B. 1981;24(2):1027.
- [28] Knight DS, White WB. Characterization of diamond films by Raman spectroscopy. Journal of Materials Research. 1989;4(2):385-93.